

Piotr Sujka
Politechnika Poznańska

ANALIZA ROZKŁADU POLA PRZEPIYWOWEGO PRĄDU W WIRNIKU TARCZOWYM HOMOPOLARNEJ MASZINY PRĄDU STAŁEGO

ANALYSIS OF CURRENT DISTRIBUTION IN DISC ROTOR OF HOMOPOLAR DC MACHINE

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki analizy rozkładu pola przepływowego prądu w wirniku tarczowym maszyny homopolarnej. Zaprezentowano dwuwymiarowy model oparty na metodzie elementów skończonych. Ograniczono się do zbadania rozkładu pola przepływowego bez uwzględniania zewnętrznego pola magnetycznego i ruchu wirnika. Opracowanie modelu uwzględniającego pozostałe zjawiska jest przedmiotem dalszych prac. Analizowano rozkład pola w tarczy zasilanej różną liczbą szczotek rozmieszczonych na obwodzie wirnika tarczowego i pierścienia wewnętrznego. Rozkład pola wyznaczony został za pomocą stworzonego w języku C programu. W algorytmie wykorzystano opracowany model.

Abstract: The article presents results of current distribution analysis in a disc rotor of a homopolar machine. The two-dimensional model based on the finite element method without taking into account external magnetic field and movement of a rotor has been proposed. Current distribution in a rotor with different number of supplying brushes has been analyzed. Field distribution has been determined using the computer program written in C language. The algorithm of the program uses the presented model.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, maszyna homopolarna, pole przepływowe

Keywords: electrical machines, homopolar machine, current distribution

1. Wstęp

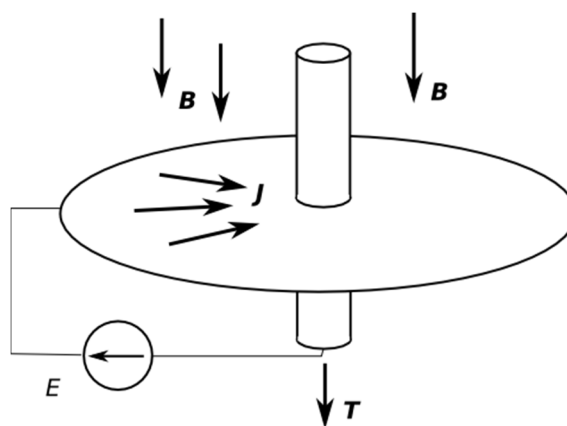
Nazwa maszyny homopolarnej wynika stąd, że elementy uzwojenia twornika ciągle przebiegają w polu o takiej samej biegunowości. Ten rodzaj maszyny prądu stałego nie znalazł zastosowania w urządzeniach powszechnego użytku. Niektórzy uważają ją za archaiczną, ponieważ była jednym z pierwszych modeli dynamy elektrycznego [5]. Impulsem do powtórnego zainteresowania się tą maszyną było pojawienie się technologii półprzewodnikowej oraz nadprzewodników [1, 2], które pozwoliły ulepszyć tę stosunkowo prostą maszynę.

Maszyna homopolarna różni się od innych maszyn prądu stałego tym, że nie wymaga komutatora. Twornik w kształcie tarczy przewodzi prąd stały, a do zapewnienia odpowiedniego styku wykorzystywane są pierścienie ślizgowe i szczotki lub czasami ciec.

Odpowiednio duże rozmiary tej maszyny pozwalają na wytworzenie dużej mocy mechanicznej wykorzystywanej np. w napędach okrętów. Jako generator może wytwarzać prądy rzędu dziesiątek kiloamperów i dlatego dobrze nadaje się do zasilania dużych urządzeń elektrochemicznych. Niestety nawet przy największych

wartościach prędkości i indukcji magnetycznej, można uzyskać znikomo małe napięcia. Uzwojenia tworników innych maszyn są wielozwojowe, podczas gdy tarcza maszyny homopolarnej stanowi odpowiednik połowy zwoju.

2. Zasada działania



Rys. 1. Zasada działania silnika homopolarnego

Przewodząca tarcza osadzona jest na wale (rys. 1). Pole magnetyczne o indukcji B skierowane jest osiowo i przenika przez tę tarczę. Podczas pracy silnikowej źródło napięcia o sile

elektromotorycznej E podłączone do zewnętrznej części i środka tarczy wytwarza prąd o gęstości \mathbf{J} (rys. 1). Oddziaływanie tego prądu z polem magnetycznym \mathbf{B} powoduje powstanie momentu elektromagnetycznego \mathbf{T} , który wprawia w ruch tarczę maszyny. W wirującym wirniku indukują się siły elektromotoryczne skierowane przeciwnie do przepływu prądu.

3. Model pola przepływowego

W celu zanalizowania rozkładu pola przepływowego z pominięciem pozostałych zjawisk założono, że wirnik umieszczony jest w przestrzeni wolnej od zewnętrznych pól magnetycznych. Do wirnika doprowadzone jest napięcie za pomocą szczotek rozmieszczonych na obwodzie tarczy i pierścienia wewnętrznego. Wyznaczony został rozkład pola przepływowego prądu stałego w tarczowym elemencie przewodzącym wywołany za pomocą zadanych potencjałów.

Równania Maxwella opisujące rozkład pola elektrycznego

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{J} = 0. \quad (1)$$

Wyrażenia te są powiązane zależnością

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (2)$$

w której σ jest konduktywnością materiału, z którego został wykonany wirnik [3].

Z równań (1) oraz różniczkowej tożsamości $\operatorname{rot}(\operatorname{grad} V) = 0$ wynika, że natężenie pola elektrycznego \mathbf{E} może być przedstawione za pomocą gradientu funkcji skalarnej V . Natężenie pola elektrycznego jest związane ze skalarnym potencjałem elektrycznym V zależnością

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} V. \quad (3)$$

Po odpowiednim podstawieniu wyżej przedstawionych równań otrzymuje się równanie opisujące rozkład skalarnego potencjału elektrycznego:

$$\operatorname{div}(-\sigma \operatorname{grad} V) = 0. \quad (4)$$

Tożsamą postacią równania (4) jest postać

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \quad (5)$$

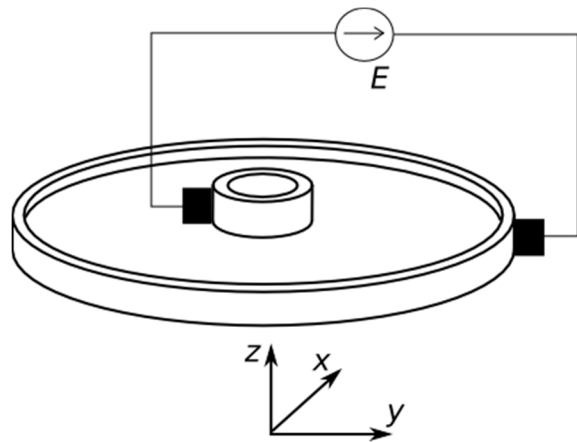
$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) = 0$$

Napięcie zasilania jest równe różnicy potencjałów na powierzchniach kontaktu szczotek z pierścieniami. Powierzchnia kontaktu elektrycznego (powierzchnia pod szczotką) jest

ekwipotencjalna tzn. każdy punkt tej powierzchni ma ten sam potencjał (rys. 2).

W rozważaniach założono, że potencjał elektryczny V nie ma składowej w kierunku osi obrotu tarczy (oś z). Zatem wektory \mathbf{E} i \mathbf{J} także nie mają składowej wzdłuż tej osi. Analizowano rozkład pola na płaszczyźnie x, y (rys. 2). Równanie (5) upraszcza się do postaci:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial y} \right) = 0. \quad (6)$$



Rys. 2. Wirnik tarczowy

W celu rozwiązania równania (6) dyskretyzuje się przestrzeń oraz wykorzystuje metodę elementów skończonych. W wyniku otrzymuje się układ liniowych równań algebraicznych modelu polowego:

$$\mathbf{S} \mathbf{V} = \mathbf{0}, \quad (7)$$

gdzie: \mathbf{S} – macierz sztywności, \mathbf{V} – wektor potencjałów elektrycznych, $\mathbf{0}$ – wektor zerowy.

Uwzględnienia warunków brzegowych Dirichleta, dokonuje się poprzez odpowiednie zmodyfikowanie macierzy sztywności \mathbf{S} i wektora zerowego. Metoda ta została stworzona przez duet Payne'a i Ironsa [4]. Elementy macierzy \mathbf{S} dla których znane są wartości potencjałów V , należy pomnożyć przez dużą liczbę, np. 10^{15} . Następnie odpowiednie elementy wektora $\mathbf{0}$ z równania (7) zastępuje się liczbą równą iloczynowi dużej współczynnika, potencjału określonego przez warunek brzegowy i elementu diagonalnego swojego wiersza.

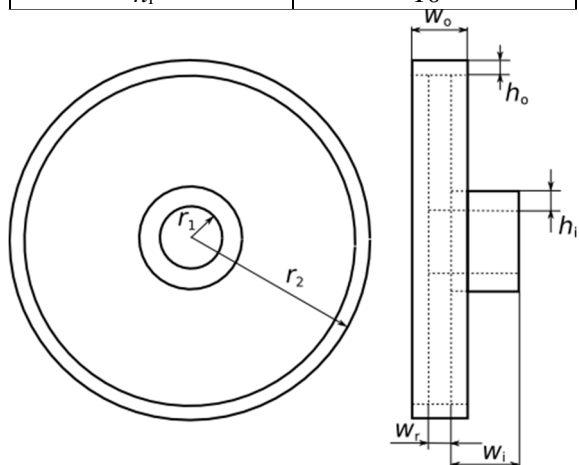
Do rozwiązania układu równań (7) użyto iteracyjnej metody gradientów sprzężonych.

4. Wyniki symulacji

Zbadano wpływ rozmieszczenia szczotek na rozkład pola wewnątrz tarczy. Pole analizowano w wirniku tarczowym o wymiarach zaprezentowanych w tabelicy 1. Przykładową siatkę dyskretyzującą przedstawia rys. 4.

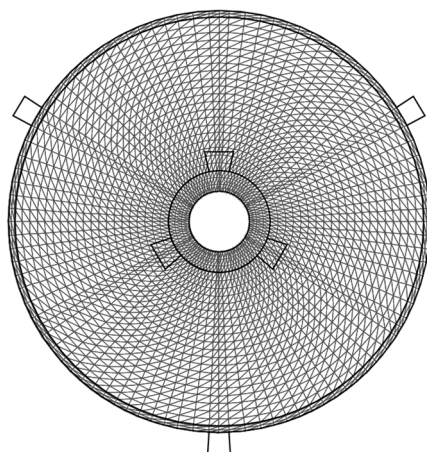
Tab. 1. Wymiary wirnika tarczowego

Symbol (z rys. 3)	Wymiar [mm]
r_1	15
r_2	103
w_r	3
w_o	5
w_i	5
h_o	3
h_i	10

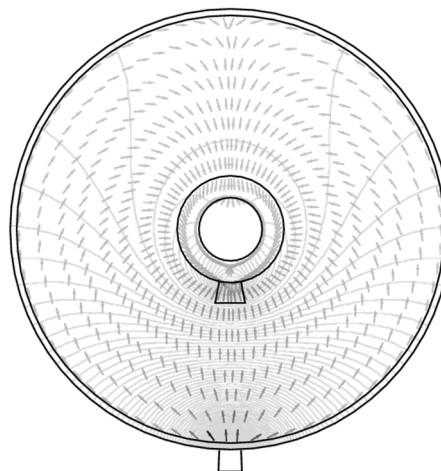


Rys. 3 Wymiary wirnika

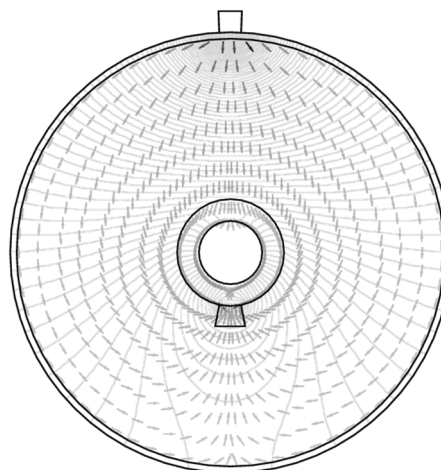
Rozkłady pola przedstawiono na rysunkach 5-9. Linie ekwipotencjalne zaprezentowano linią ciągłą, natomiast strzałkami – kierunek i zwrot prądu wewnątrz wirnika. Założono, że wirnik wykonany jest w całości z miedzi i zasilany jest ze źródła o napięciu 0,1 V.



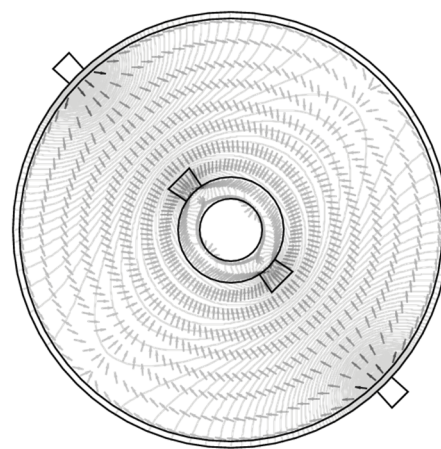
Rys. 4. Przykładowa siatka dyskretyzująca



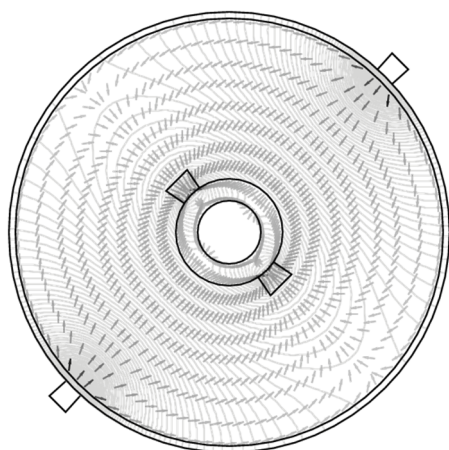
Rys. 5. Rozkład pola przepływowego (1 para szczotek – po jednej stronie)



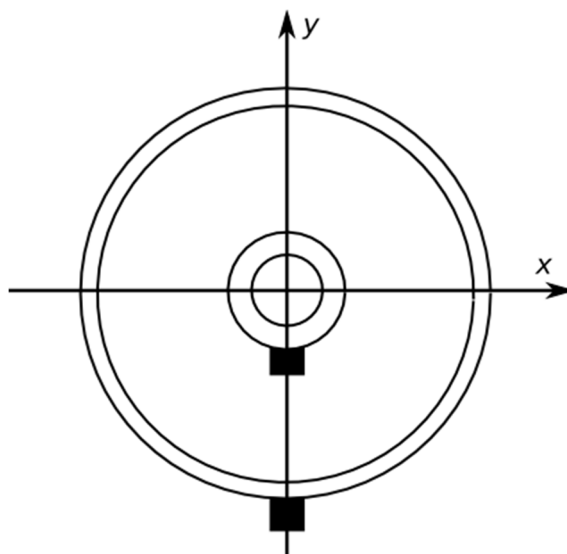
Rys. 6. Rozkład pola przepływowego (1 para szczotek – po przeciwnych stronach)



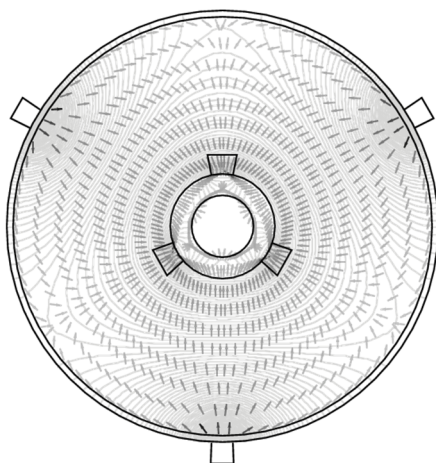
Rys. 7. Rozkład pola przepływowego (2 pary szczotek)



Rys. 8. Rozkład pola przepływowego (2 pary szczotek – pary szczotek nie są umieszczone w jednej linii)

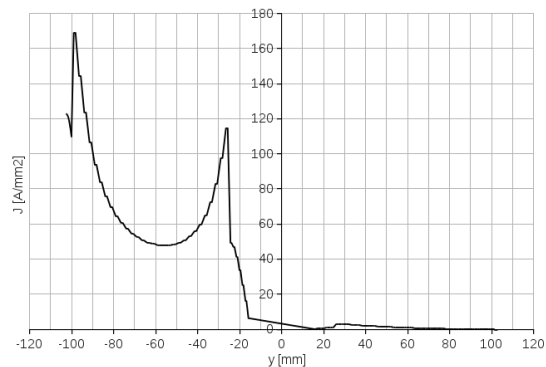


Rys. 10. Wirnik tarczowy w układzie współrzędnych – jedna para szczotek po tej samej stronie

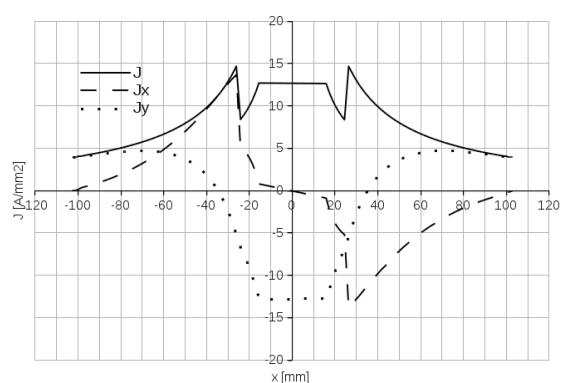


Rys. 9. Rozkład pola przepływowego (3 pary szczotek – pary szczotek nie są umieszczone w jednej linii)

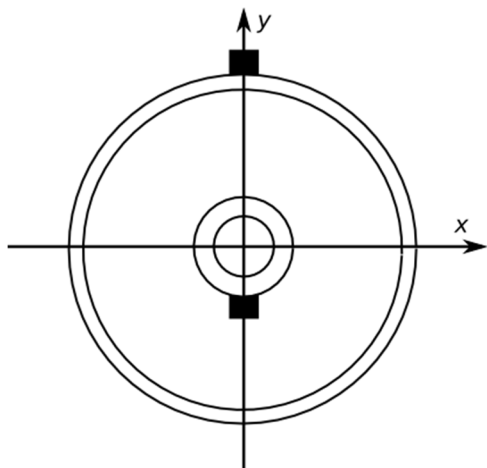
Rysunki 11 i 12 przedstawiają wartości gęstości prądu wzdłuż osi y i x układu zaprezentowanego na rysunku 10, natomiast rysunki 14 i 15 wartości gęstości prądu układu zaprezentowanego na rysunku 13.



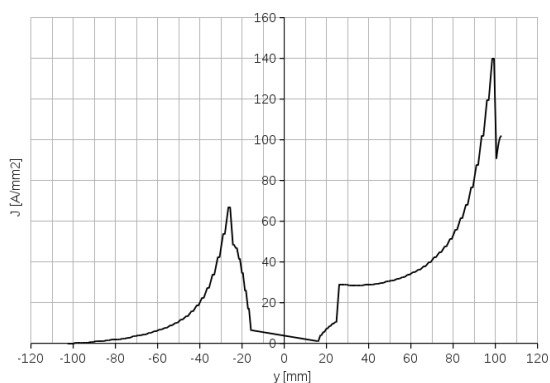
Rys. 11. Gęstość prądu wzdłuż osi y (przy ułożeniu szczotek jak na rys. 10)



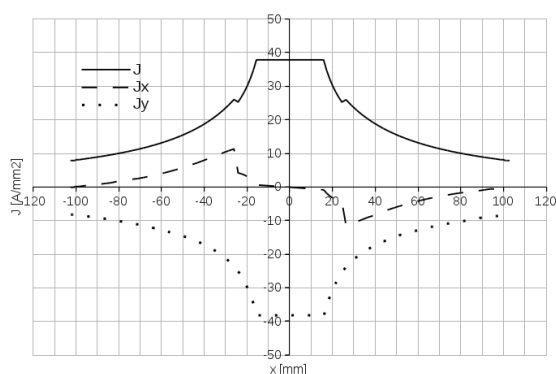
Rys. 12. Gęstość prądu wzdłuż osi x (przy ułożeniu szczotek jak na rys. 10)



Rys. 13. Wirnik tarczowy w układzie współrzędnych – jedna para szczotek po przeciwnych stronach



Rys. 14. Gęstość prądu wzdłuż osi y (przy ułożeniu szczotek jak na rys. 13)



Rys. 15. Gęstość prądu wzdłuż osi x (przy ułożeniu szczotek jak na rys. 13)

5. Podsumowanie

Opracowano dwuwymiarowy model pola przepływowego prądu. Na jego podstawie stworzono oprogramowanie wyznaczające rozkład pola w wirniku tarczowym maszyny homopolarnej. Program umożliwia obliczanie rozkładu pola przy różnych wymiarach tarczy i różnym rozmieszczeniu szczotek.

Przedstawiono wyniki analizy pola przepływowego i wartości gęstości prądu dla kilku położenia szczotek.

Zaprezentowany model umożliwia obliczenia wyłącznie statycznego pola przepływowego w wirniku. Opracowanie modelu uwzględniającego pozostałe zjawiska występujące w maszynie homopolarnej jest przedmiotem dalszych prac.

6. Literatura

- [1] Barmada S., Musolino A., Raugi M., Rizzo R., *Analysis of a Homopolar Disc Generator via Equivalent Network*, IEEE Transaction on Magnetics, 2003, Vol. 39, No. 1, pp. 125-128.
- [2] Ishigohka T., Ninomiya A., Hayakawa K., Mitsuhashi T., *Fabrication and test of a small experimental superconducting homopolar machine with axially laminated rotor disks*, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2001/2002, vol.14, No.1-4, pp. 115-120
- [3] Sikora R., *Teoria pola elektro-magnetycznego*, Warszawa, WNT 1997.
- [4] Sikora J., *Numeryczne metody rozwiązywania zagadnień brzegowych*, Lublin, Politechnika Lubelska 2011.
- [5] Tesla N., *Notes on a unipolar dynamo*, N.Y., The Electrical Engineer 1891

Autorzy

dr inż. Piotr Sujka, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, e-mail: piotr.sujka@put.poznan.pl